



DLR Workshop
DIV 1 "Diagnostik in Verbrennungen"
Göttingen, 5. bis 6. Oktober 2005

Untersuchungen zur Wechselwirkung von Akustik und Verbrennung an einer LOX/H₂-Modellbrennkammer

Bernhard Knapp, Silke Anders, Michael Oschwald

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Raumfahrtantriebe
74239 Hardthausen**

Motivation und Ziel

Motivation

- ▶ HF-Verbrennungsinstabilitätsprobleme bei fast allen Entwicklungsprogrammen in USA, Japan, Russland, Europa
- ▶ bis heute keine befriedigendes Verständnis der der grundlegenden Wechselwirkungen von Akustik und BK-Prozessen (Zerstäubung, Verdampfung, Verbrennung...)

Ziel

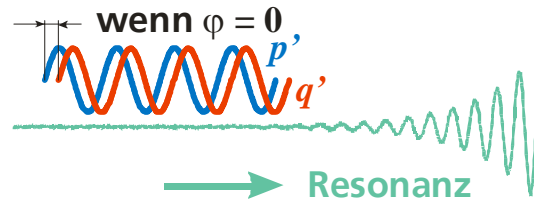
- ▶ Verstehen der physikalischen Prozesse und Kopplungsmechanismen bei Verbrennungsinstabilitäten in Raketentriebwerken mit flüssigen Treibstoffen
- ▶ Entwicklung von physikalischen Modellen und „Vorhersage-Tools“
- ▶ Konstruktive Maßnahmen zur Stabilitätsverbesserung (Baffles, Cavities, ...)

Mechanismus für akustische Verbrennungsinstabilitäten

Brennkammerprozesse

- Einspritzung
- Zerstäubung
- Verdampfung
- Mischung
- Verbrennung

Phasenbeziehung **Druck** ↔ **Wärmefreisetzung**



Rayleigh Kriterium

$$\iiint \int_0^{2\pi} p' q' dt dV > 0$$

Druckschwankungen p'

Schwankungen in der Wärmefreisetzung q'

Einfluss einer akustischen Welle auf den Verbrennungsprozess

akustischer Druck

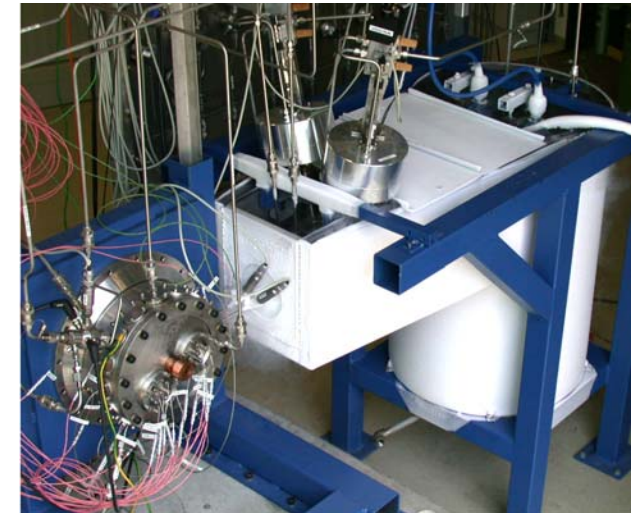
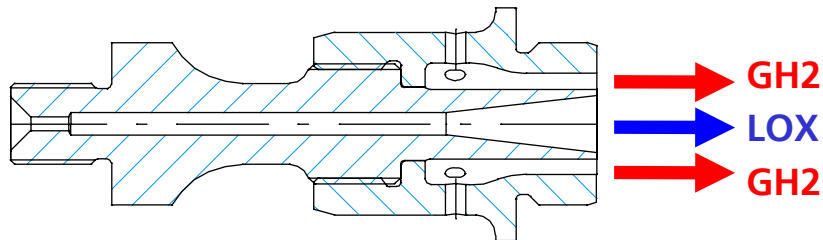
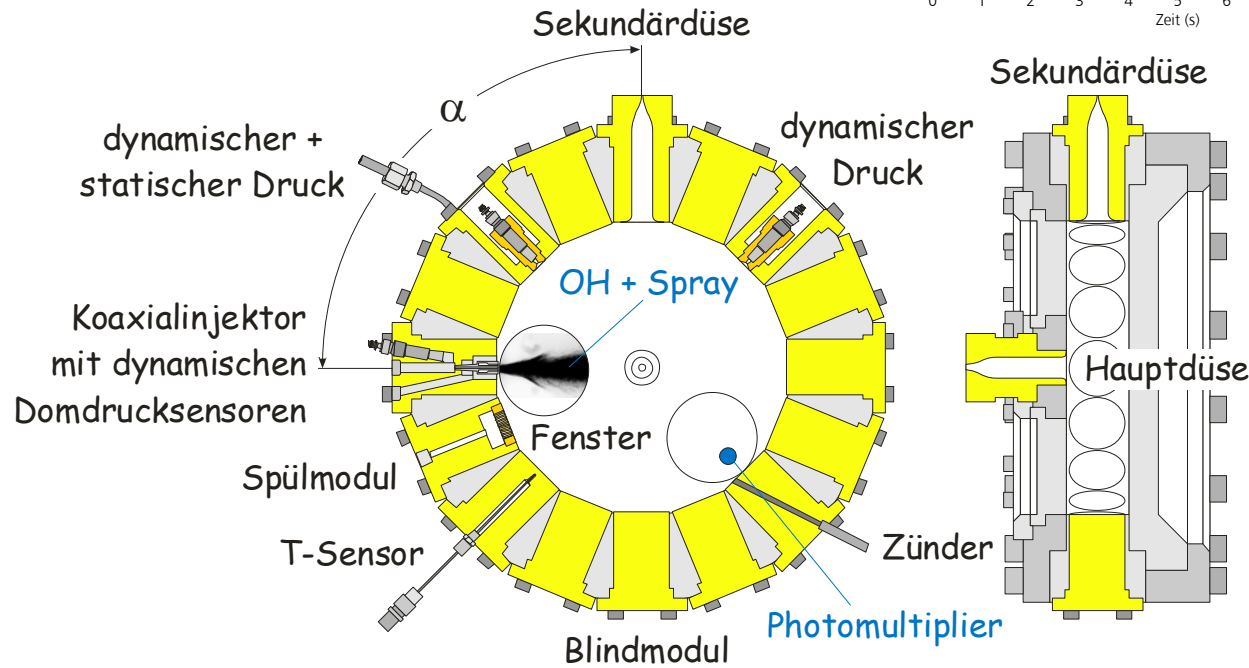
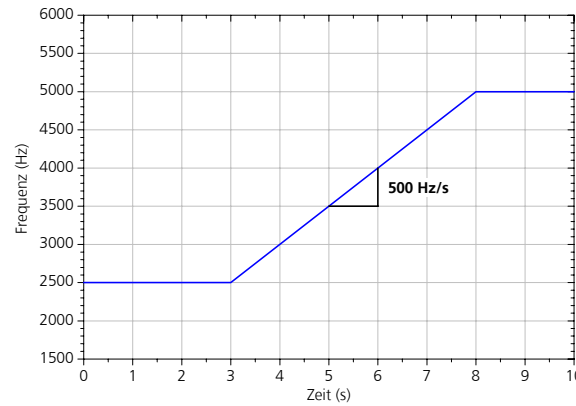
akustische Geschwindigkeit

???

- momentane Einspritzrate
- lokale Verdampfungsrate
- chemische Reaktionsrate

- Zerstäubung
- Verdampfung
- Mischung

Versuchsaufbau



Optische Diagnostik

2 Hochgeschwindigkeitskameras

► Spray

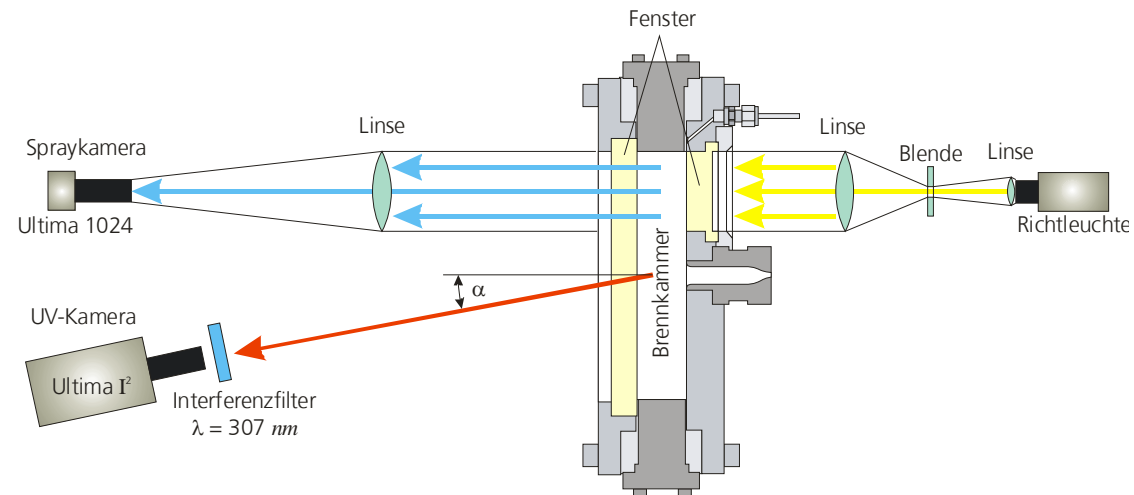
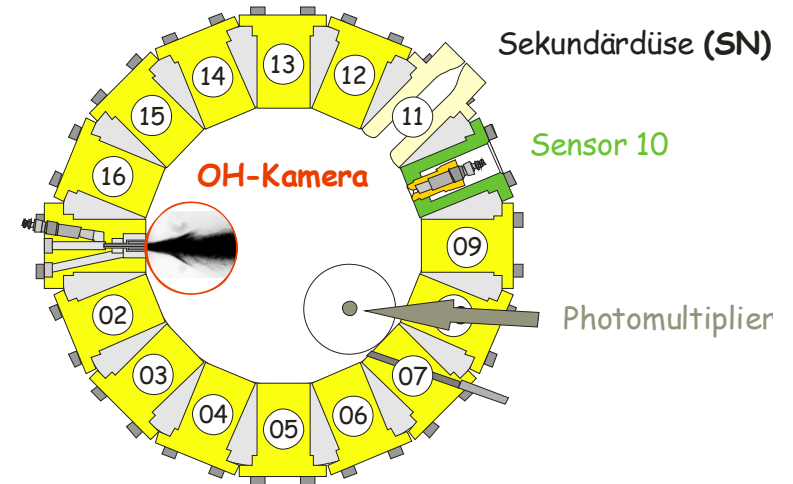
- Photron Ultima 1024 C
- 16000 *Bilder/s*
- Auflösung 256x32 *pixel*

► OH-Flammenemission

- Photron Ultima I2
- Interferenzfilter 307 *nm*
- 27000 *Bilder/s*
- Auflösung 128x64 *pixel*

Photomultiplier (OH-Flammenemission), (35 *kHz*)

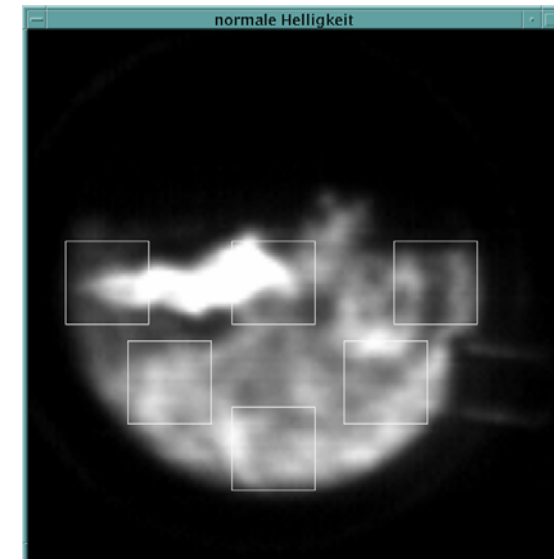
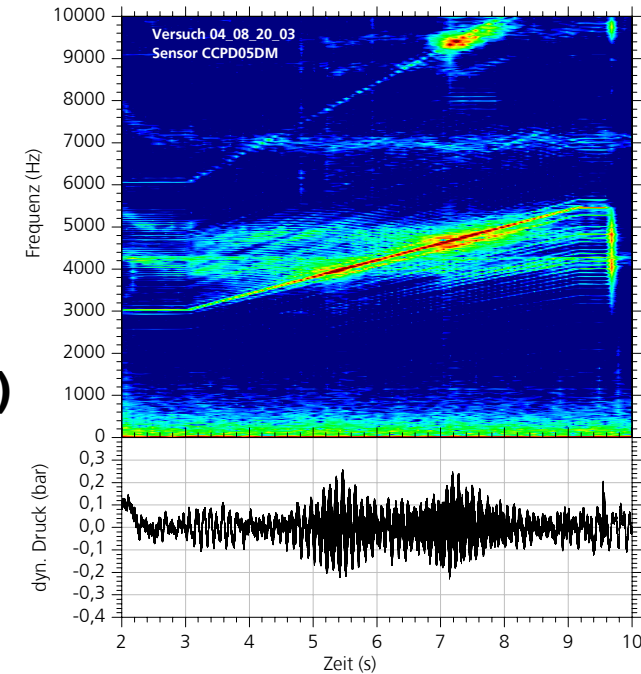
Videokamera (50 *Hz*)



Auswertung

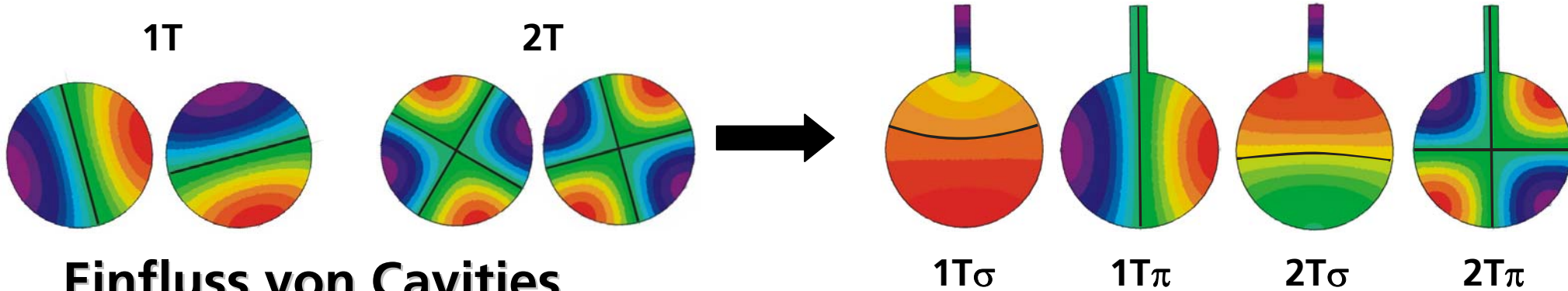
Antwort der Brennkammer auf eine Störung (Anregung)

- ▶ **Druckschwingungen** (dyn. Drucksensoren 35 kHz)
 - Druckspektrum (Druckschwankung $p' = \Delta p / P_c$)
 - gleitende FFT-Analyse
 - Spektrogramm
- ▶ **Wärmefreisetzungsschwingungen** (HS-Videos 27 kHz)
 - Grauwerte (Intensitätsschwankung $q' = \Delta I / I$)
 - FFT-Analyse
 - Spektrogramm



Orientierung der Moden

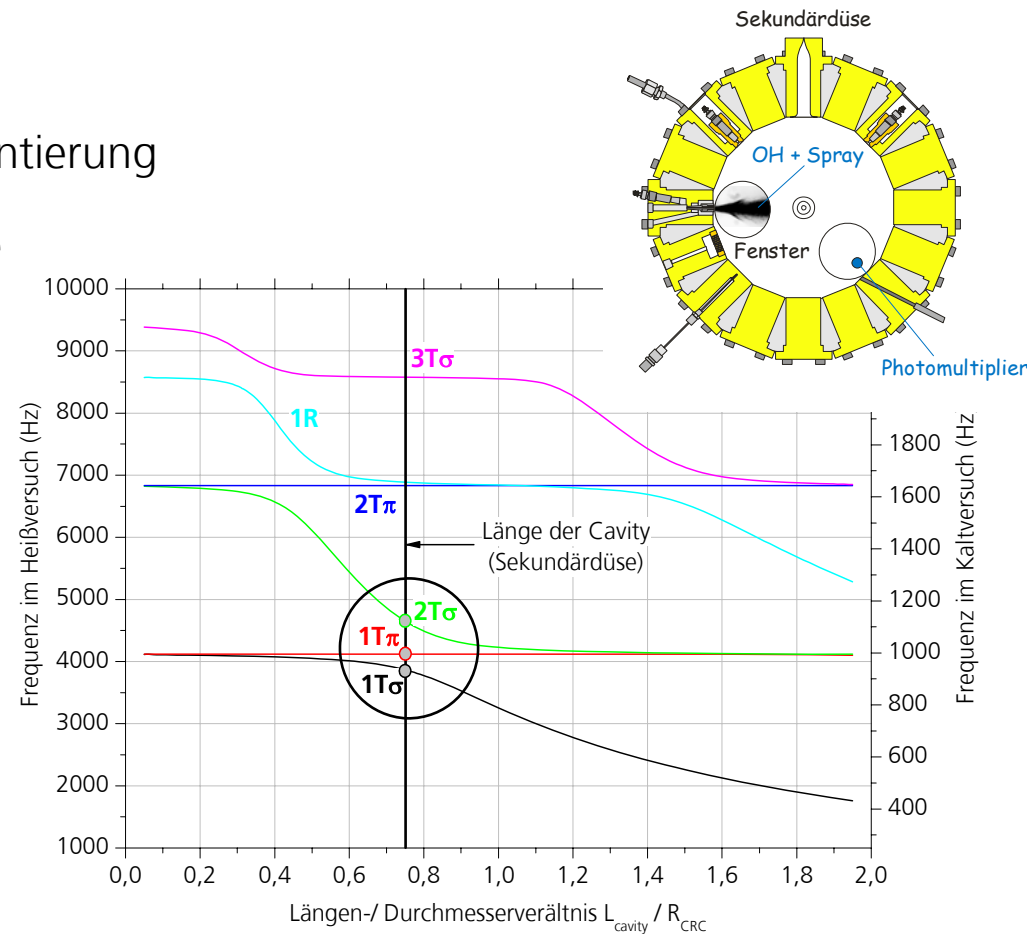
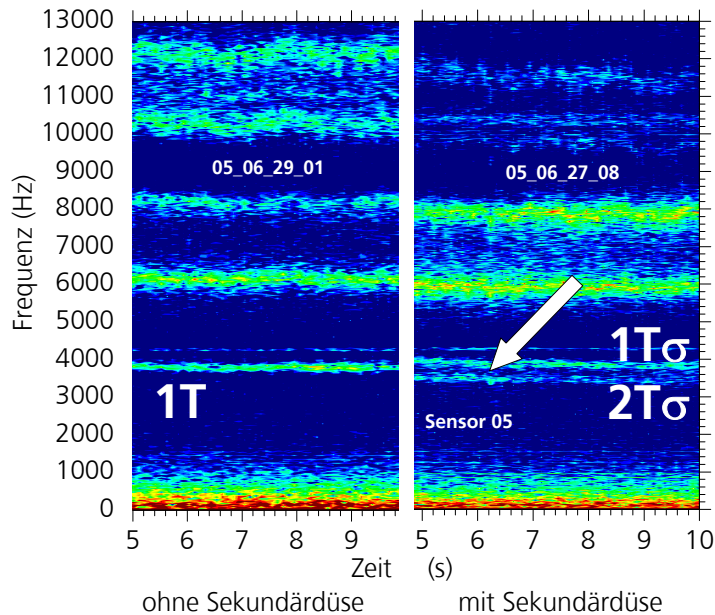
Responsefaktor $N = q' / p'$



Einfluss von Cavities

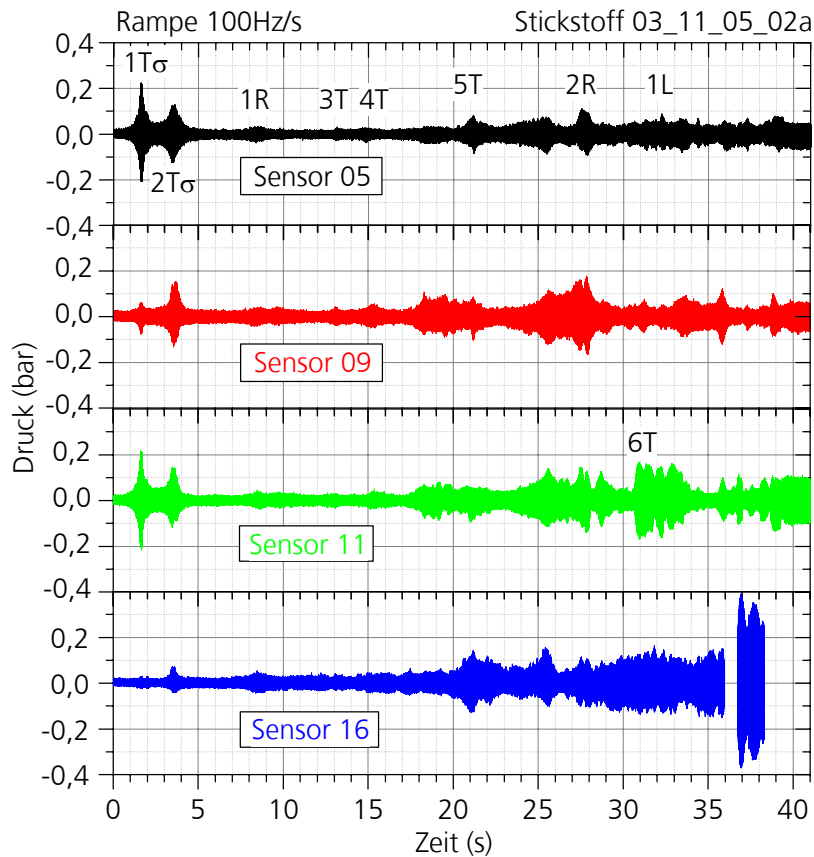
Unterschied ohne / mit Cavity

- ▶ ohne Cavity: keine ausgezeichnete Orientierung
- ▶ mit Cavity: "Aufspaltung" der 1T Mode

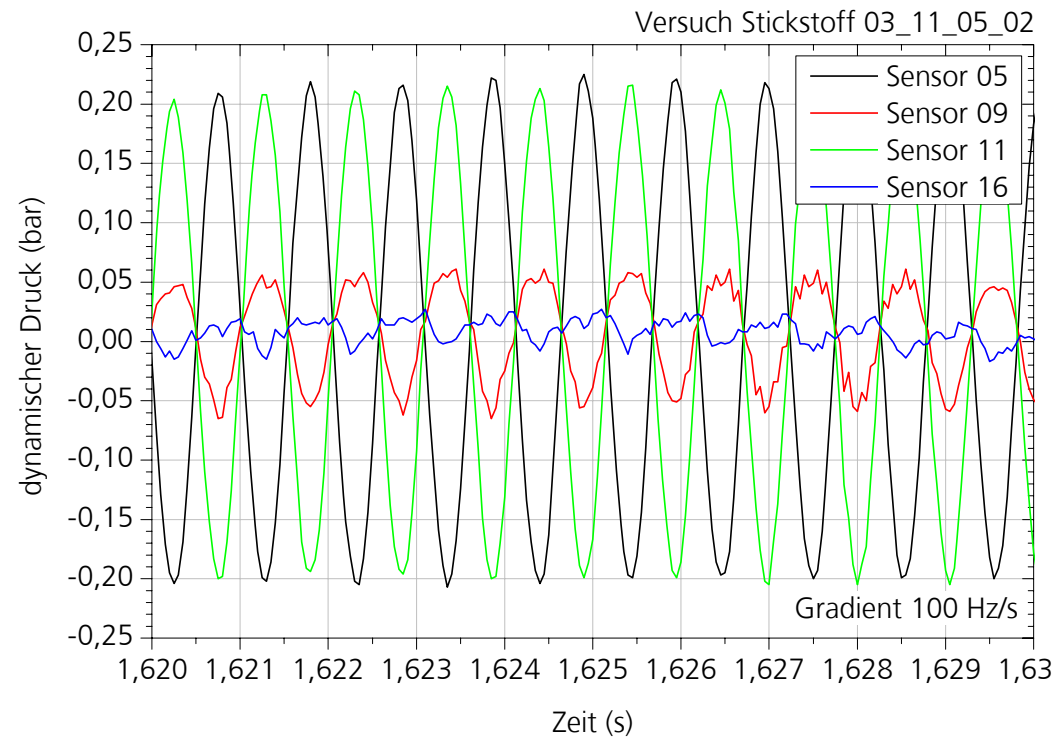
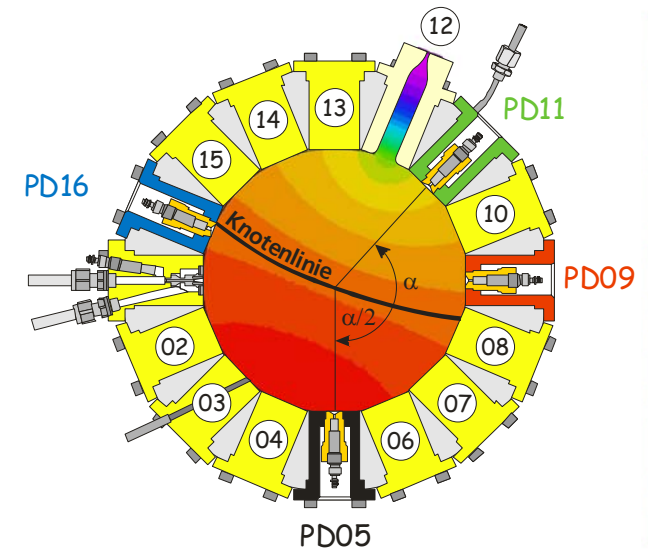


Kaltversuche (1)

Orientierung der Moden



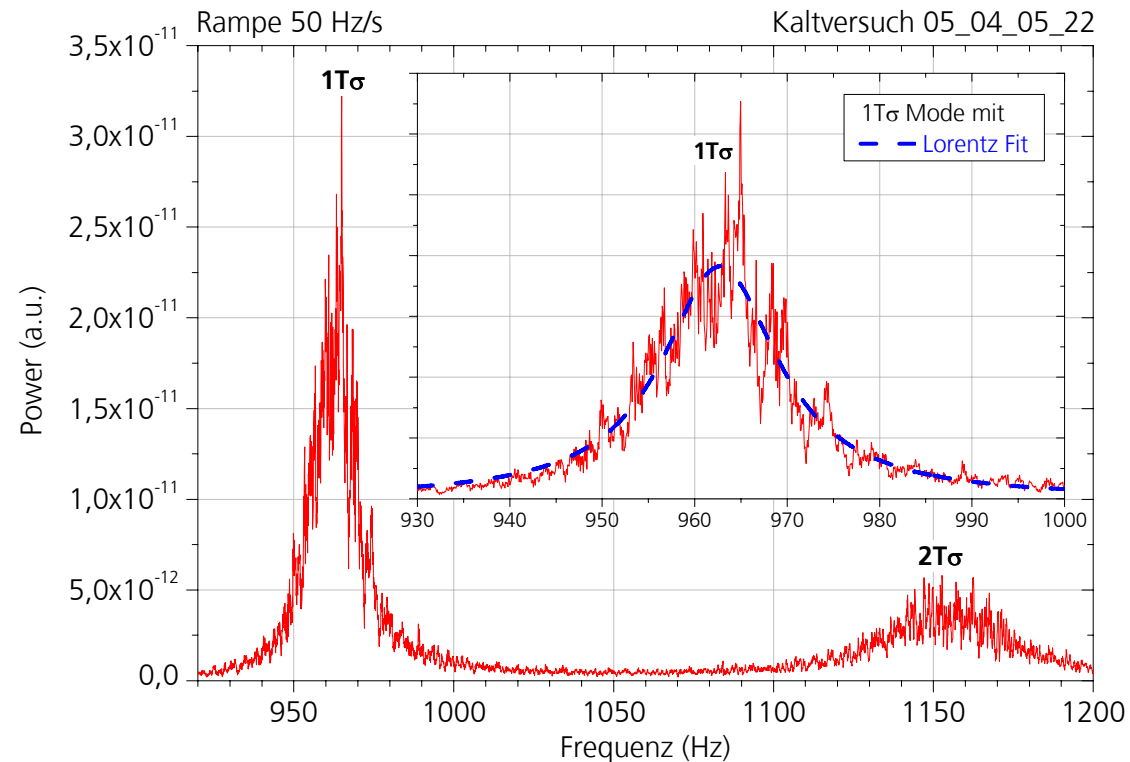
Beispiel 1Tσ Mode



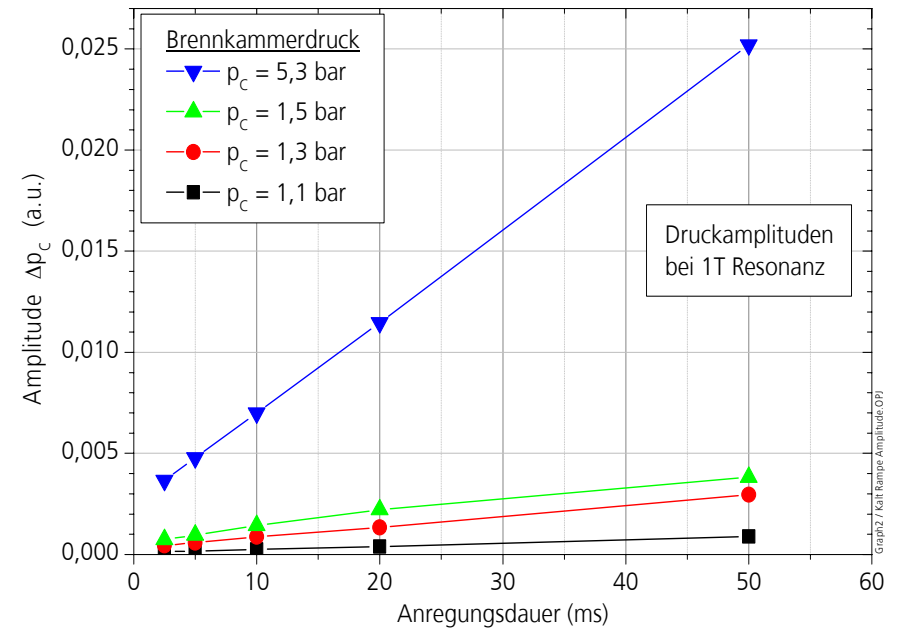
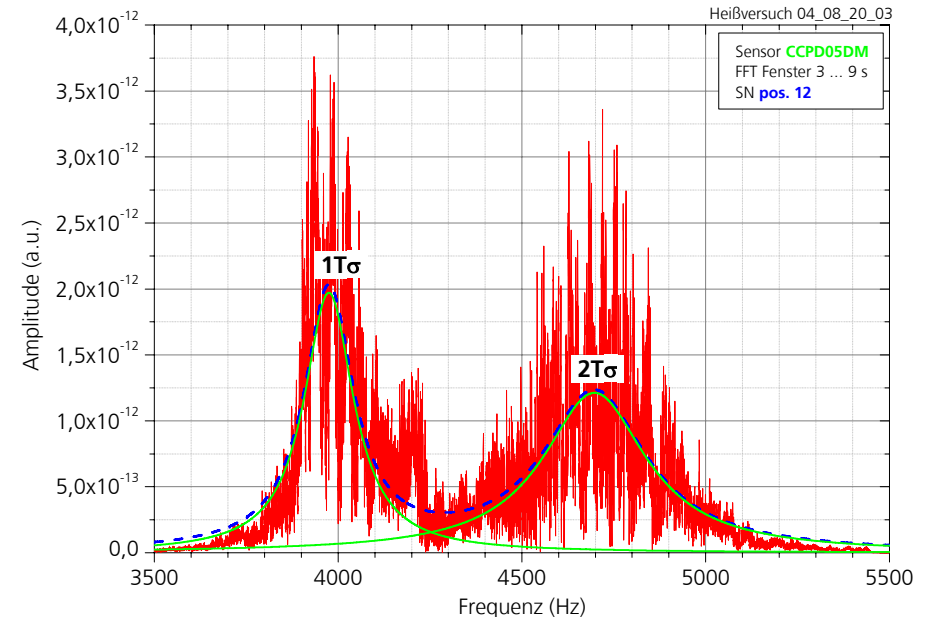
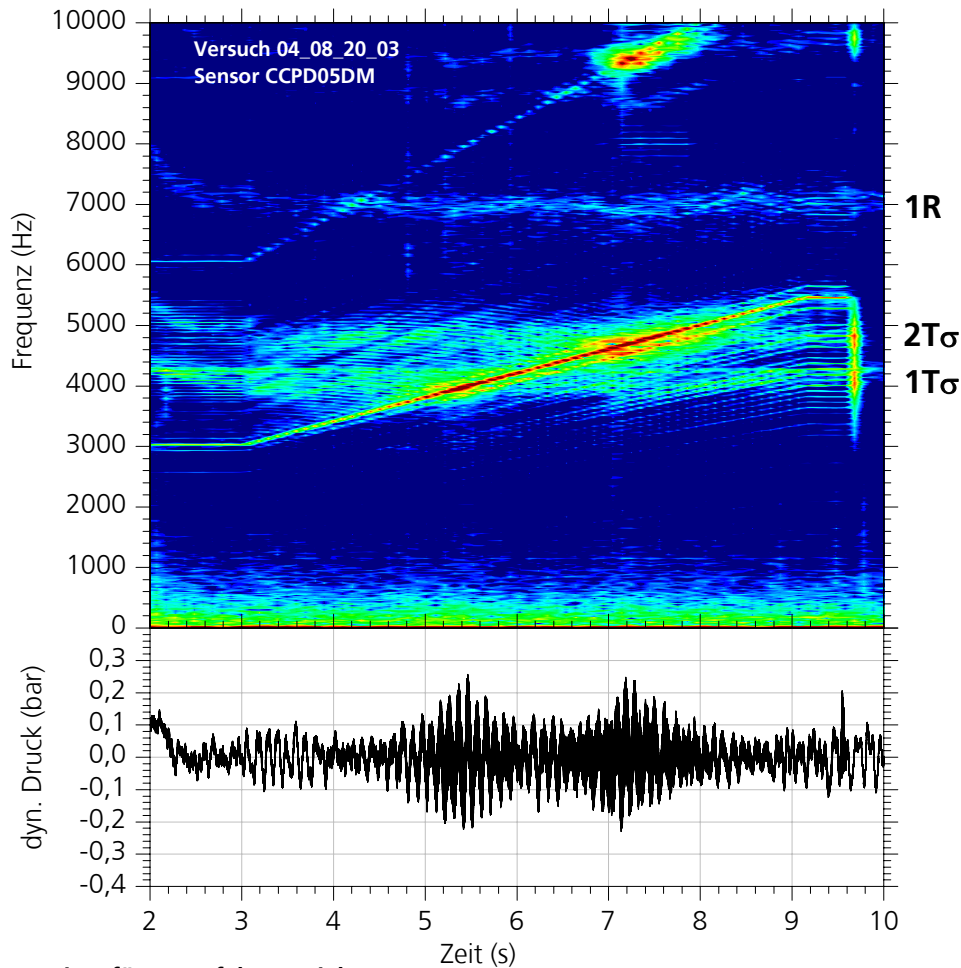
Kaltversuche (2)

Resonanzprofile (hochaufgelöst)

- ▶ T und R Mode sind gut anzuregen
- ▶ Lorentz Profil
- ▶ Profile stark strukturiert durch
 - zusätzliche Resonanzkörper (Bohrungen, Vertiefungen, Spalte, ...??)
- ▶ Halbwertsbreite Γ als Maß für Dämpfung
- ▶ gleiche Profile in Heißtests

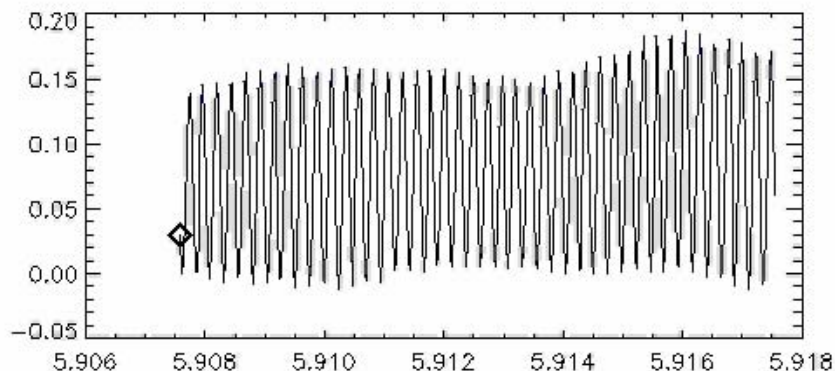
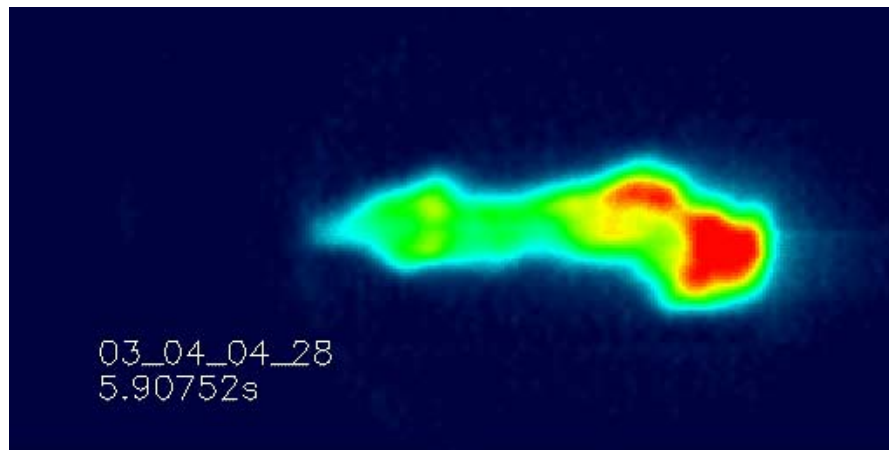


Heißversuche

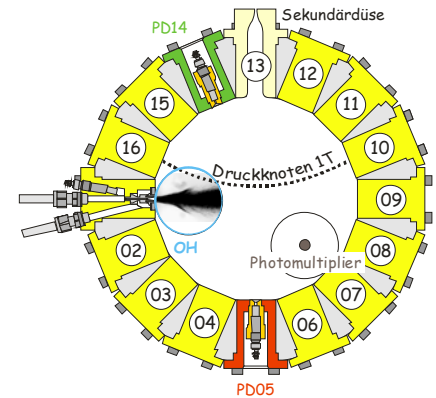
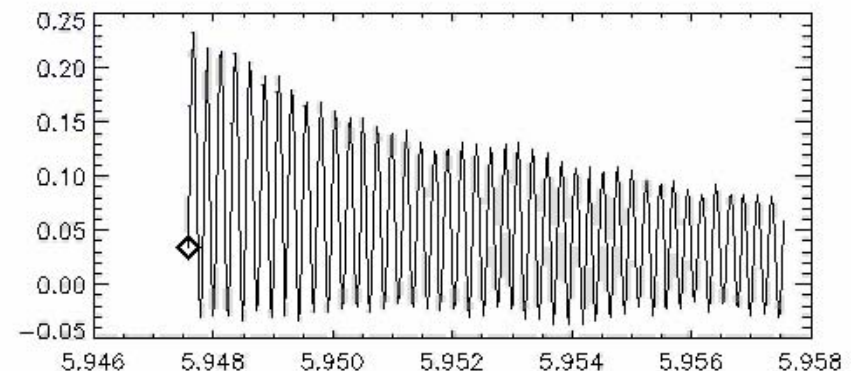
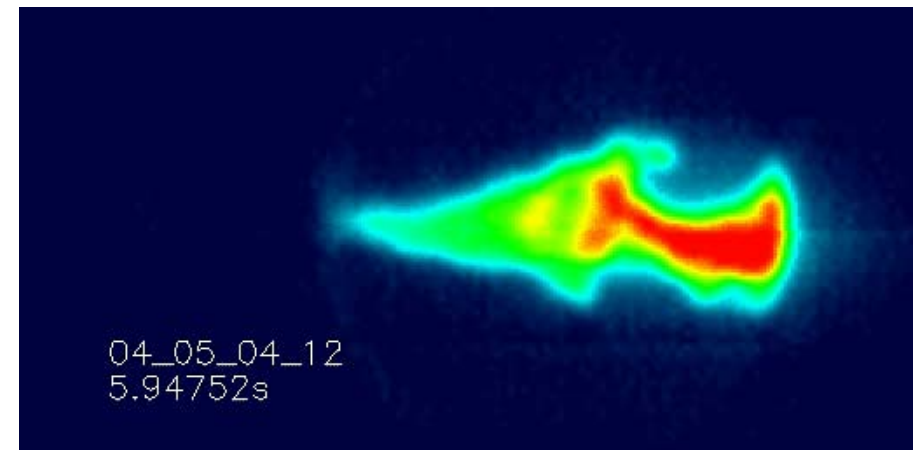


Messung der Wärmefreisetzung: OH-Flammenemission und externe Anregung

Anregung 90° relativ zum Injektor



Anregung 180° relativ zum Injektor



2D-Verteilung der Intensitätsschwankung

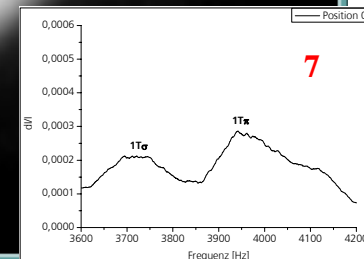
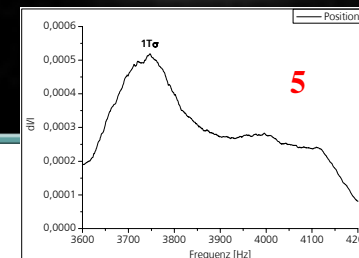
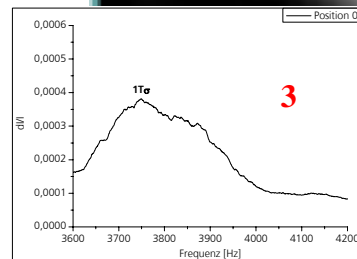
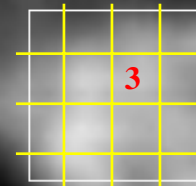
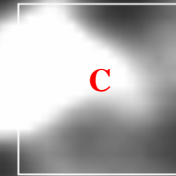
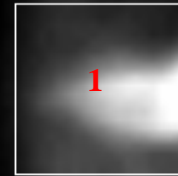
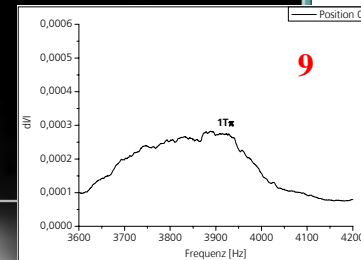
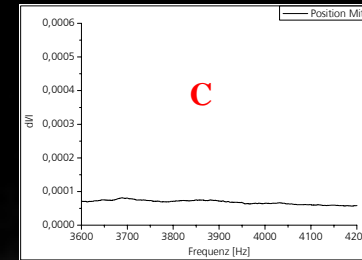
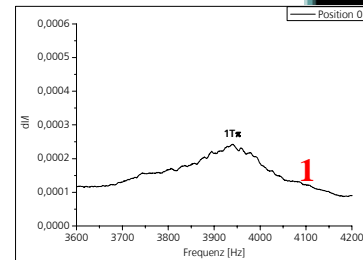
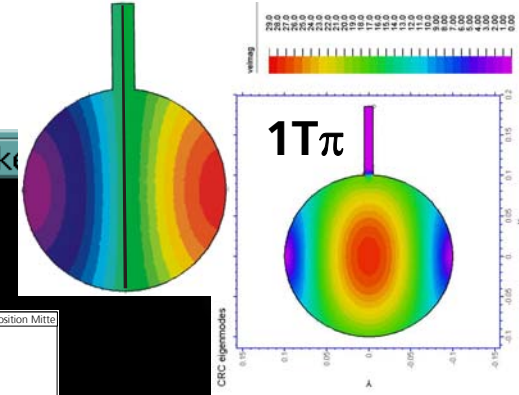
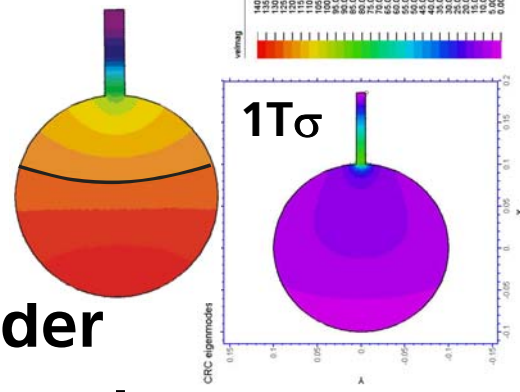
HS-Aufnahme

- ▶ Dauer ca. 2 sec
- ▶ Rampe regt $1T\sigma$ und $1T\pi$ an

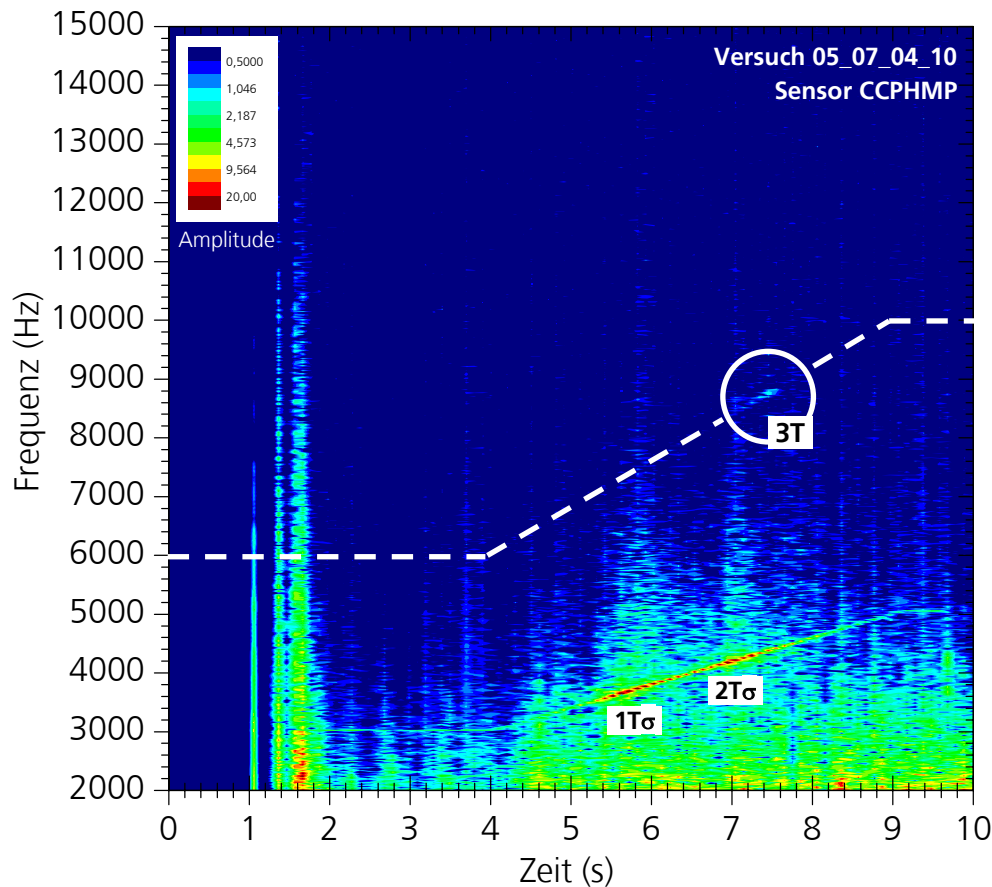
Hinweis auf Druckkopplung

- ▶ σ auf Pos. 5 sehr hoch
- ▶ π auf Pos. 1 und 9 hoch
- ▶ π auf Pos. 5 so hoch wie 9

Geschwindigkeitsschwankung
bei $1T\sigma$ und $1T\pi$ an diesen Orten niedrig!



Unterstützung der OH-Analyse mit Photomultiplier

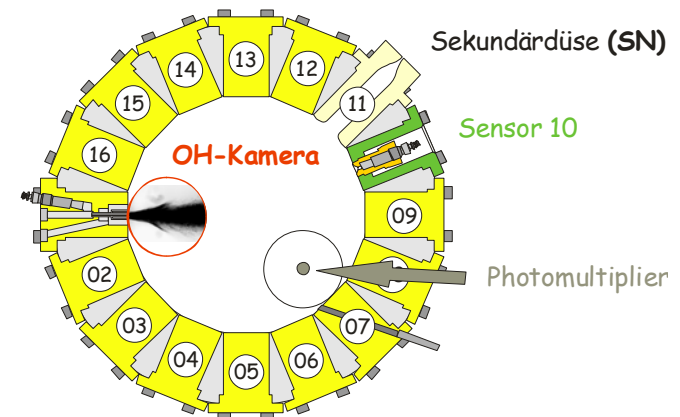


Punktmessung in **zusätzlichem Fenster**

- ▶ Interferenzfilter (306 – 315 nm)

Antwort der Brennkammer

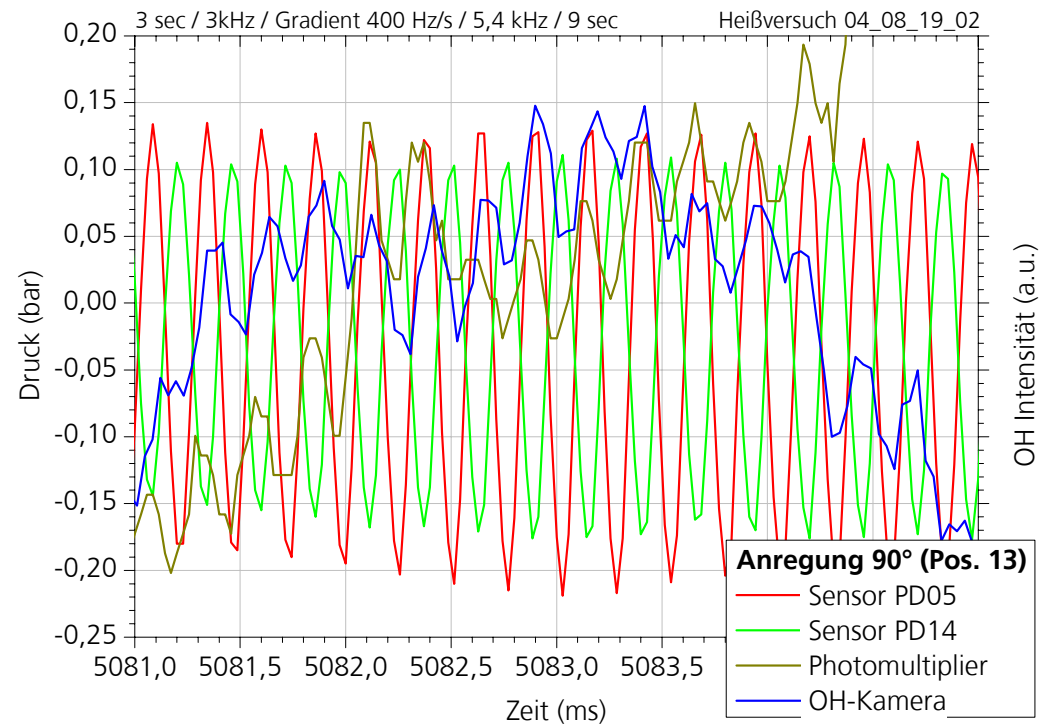
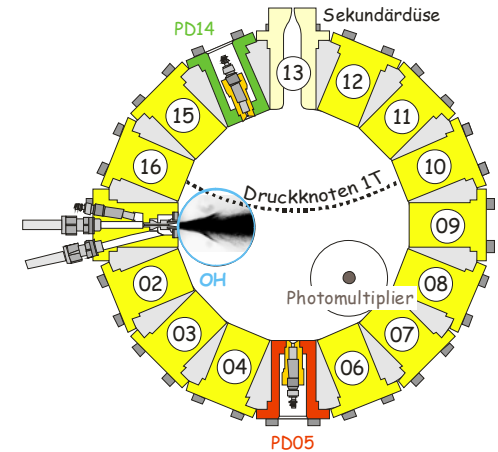
- ▶ Rampe sichtbar
- ▶ 1Tσ und 2Tσ Mode sichtbar
- ▶ Oberschwingung regt 3T Mode an



Vergleich Druck- und OH-Intensitätsschwankung

OH-Emission bei 1T Resonanz

- ▶ gute Übereinstimmung der FFT-Druck- und Intensitätsspektren, $\varphi=0$
- ▶ Lage der Druckknotenlinie bekannt
- ▶ $I(t)$ schwache OH Amplitude
- ▶ externe Anregung 90°
 - Einspritzvorgang unterhalb der Druckknotenlinie
 - → keine oder schwache Druckkopplung
 - gleiche Frequenz von OH und p_{dyn}

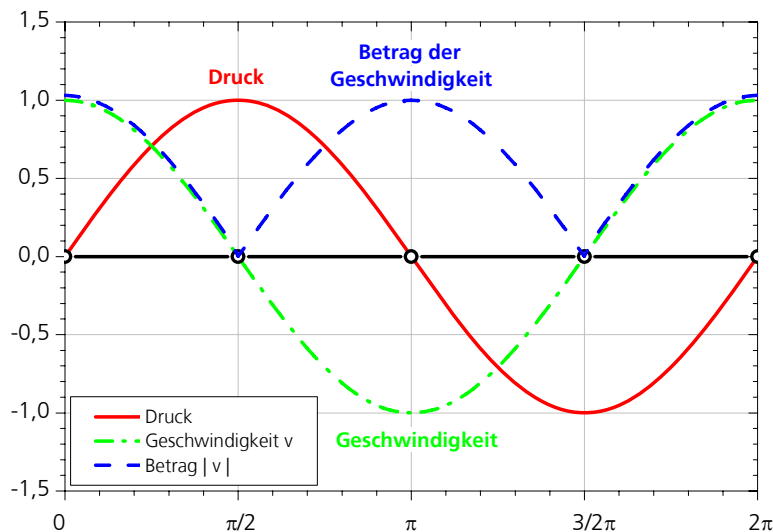


nicht verträglich mit Kopplung an Geschwindigkeitsfeld – da ...

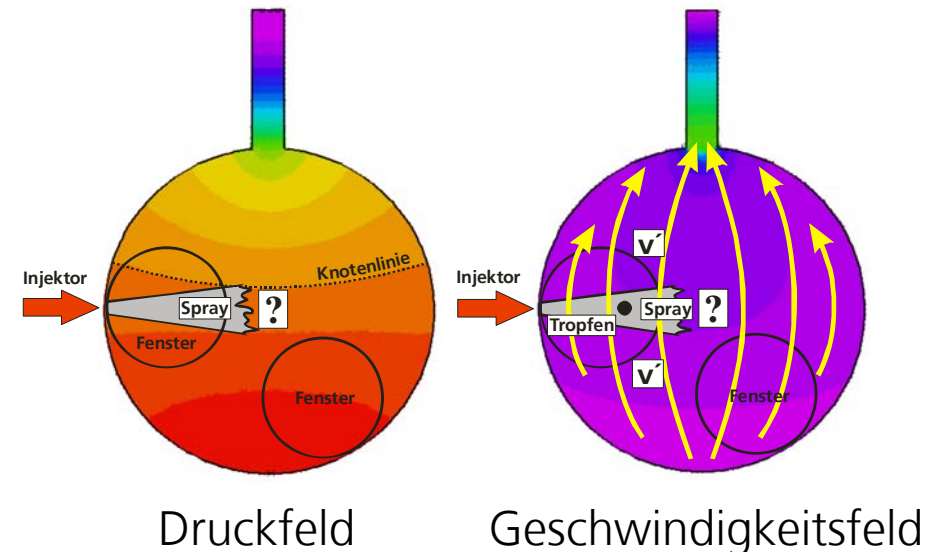
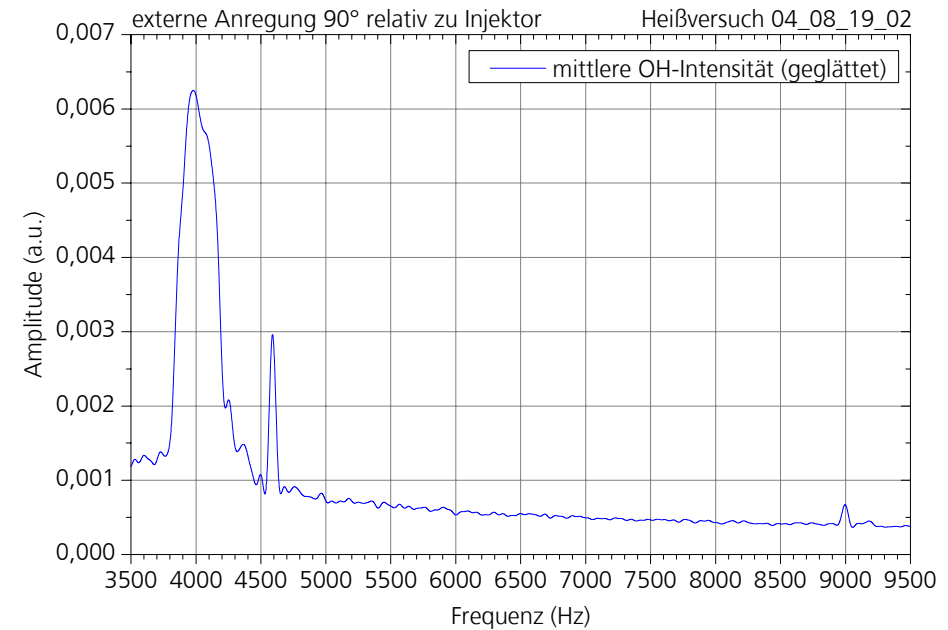
Druck- oder Geschwindigkeitskopplung?

90° Anregung → p vs v-Kopplung

- ▶ Betrag der Geschwindigkeit $|v| = 2\omega$
- ▶ doppelte Frequenz bei der Geschwindigkeit
- ▶ Antwort der Brennkammer: doppelte Frequenz von I' → **nein**

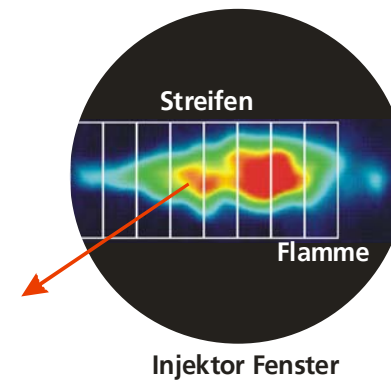
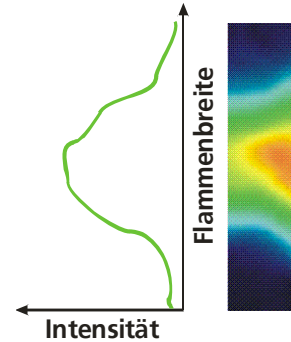
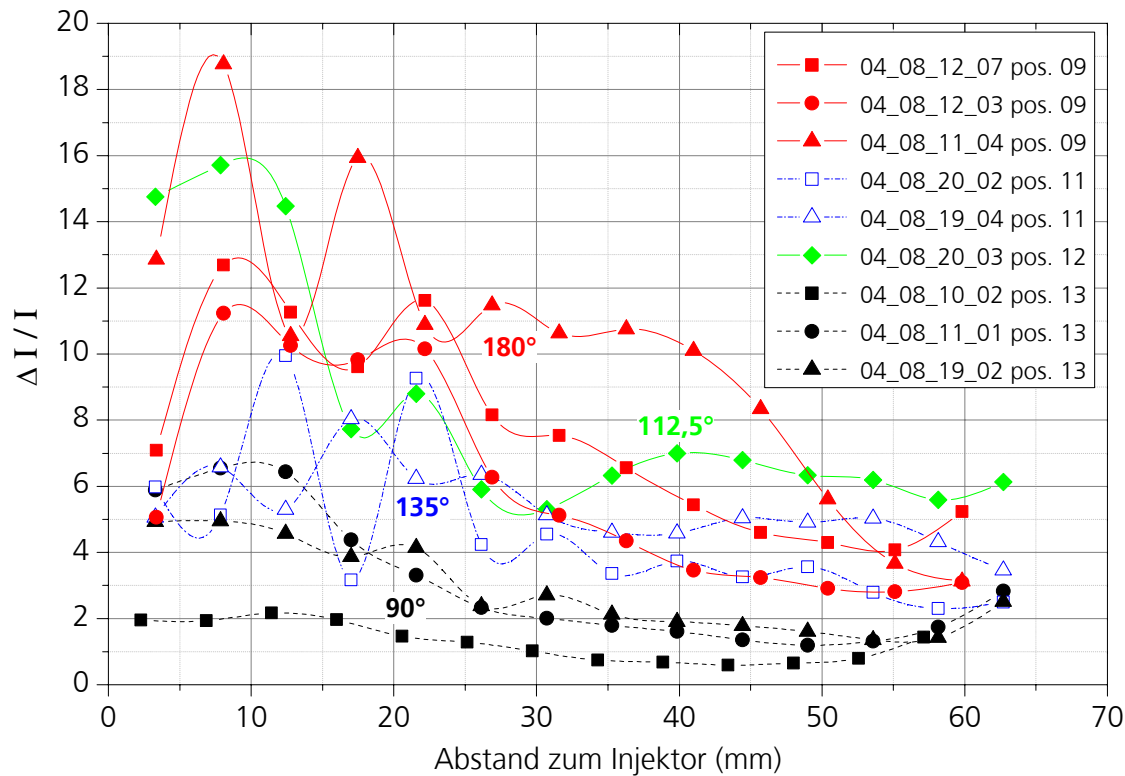


Institut für Raumfahrtantriebe



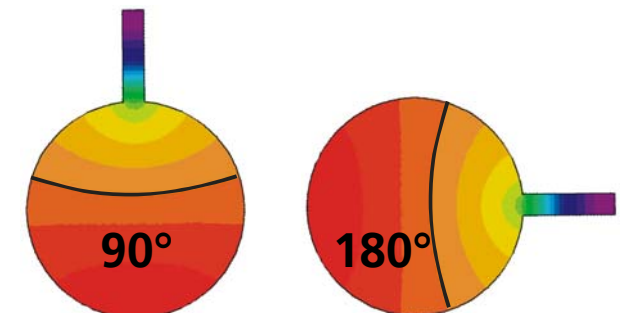
Lokale OH-Intensität

$\Delta I/I$ als Funktion des Injektorabstands
mit Variation der Anregungsposition



Hinweise auf Druckkopplung

- ▶ 180° Anregung zeigt hohe Intensitätsschwankung
- ▶ 90° Anregung zeigt geringe Amplituden
- ▶ relative Intensitätsschwankung nimmt ab mit zunehmendem Injektorabstand



Response Faktor N

Antwort auf eine Störung

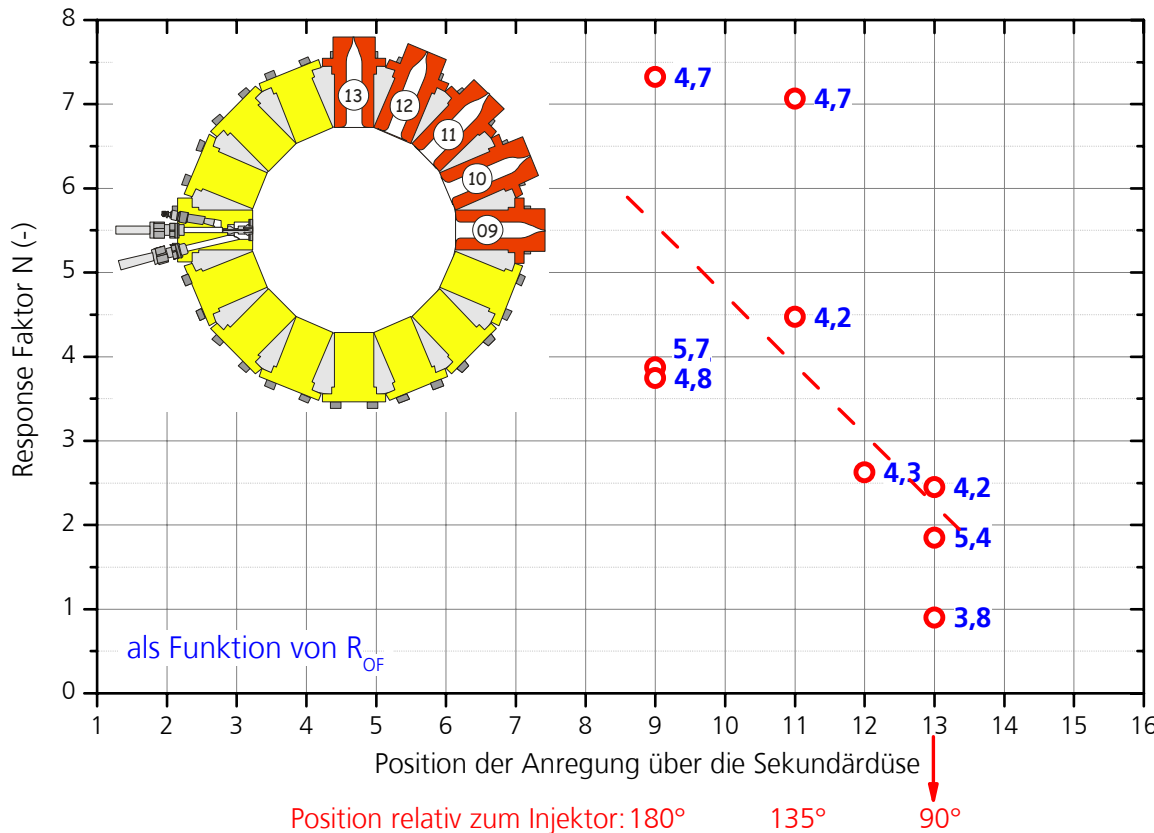
$$N = \frac{\int_V \int_0^{2\pi} p'(V, t) \cdot q'(V, t) dt dV}{\int_V \int_0^{2\pi} [p'(V, t)]^2 dt dV}$$

$$p' = p'_{\max} \sin(\omega t)$$

$$q' = q'_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$$

$$N = \frac{q'_{\max}}{p'_{\max}} \cdot \cos \varphi$$

$$N = k \cdot \frac{I'_{\max}}{p'_{\max}} \cdot \cos \varphi$$



- ▶ Verhältnis der relativen Intensitätsschwankung zur relativen Druckschwankung

$$N = k \cdot \frac{\frac{\Delta I_{OH}}{I_{OH}}}{\frac{\Delta p}{P_{CRC}}} \cdot \cos \varphi$$

- ▶ k wegen unterschiedlicher Abstraten von p' und I' (FFT)
- ▶ Hinweis auf Druckkopplung

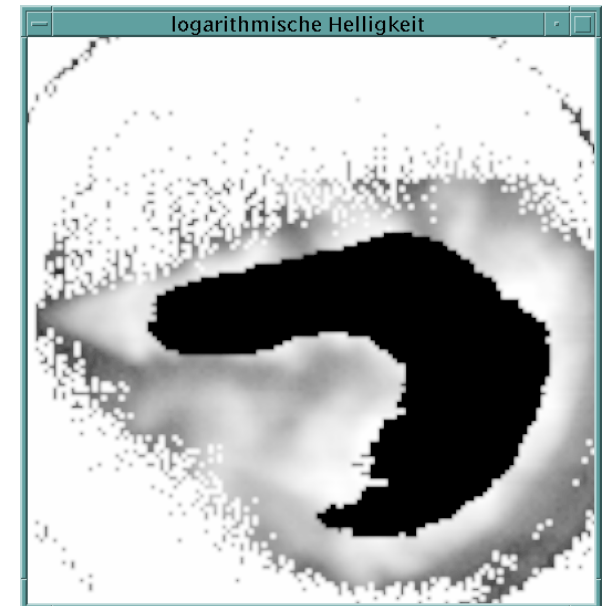
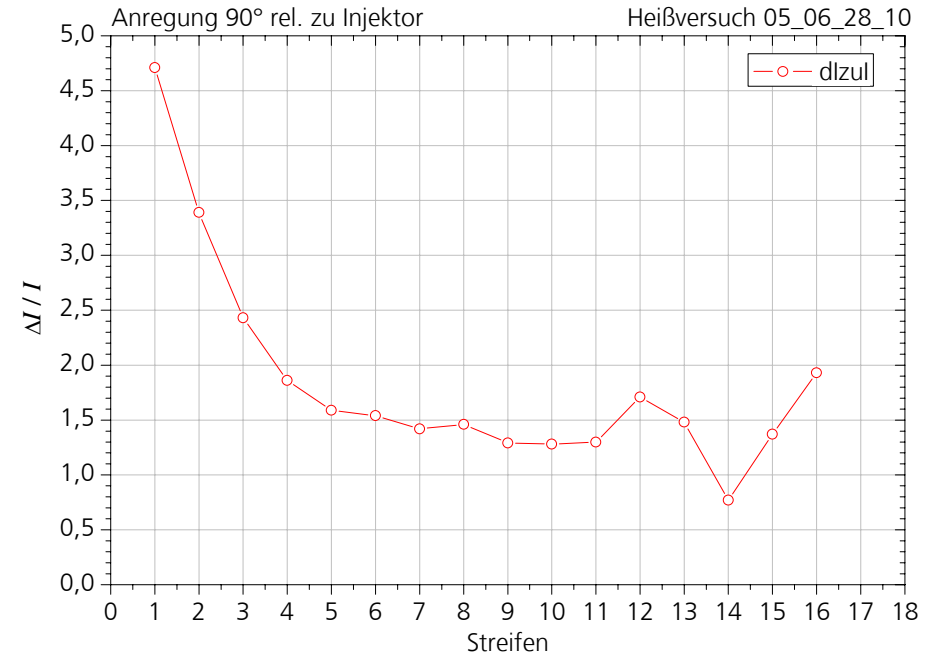
Fehler durch Übersteuerung

Programm Gaincheck

- ▶ 8 Bit Informationsgrenze
- ▶ Bilder im schwarzen Bereich zu hell und im weißen Bereich zu dunkel
- ▶ Verfälschung von $\Delta I/I$, da zu hohe Helligkeit → $\Delta I/I$ wird zu klein

Verbesserung

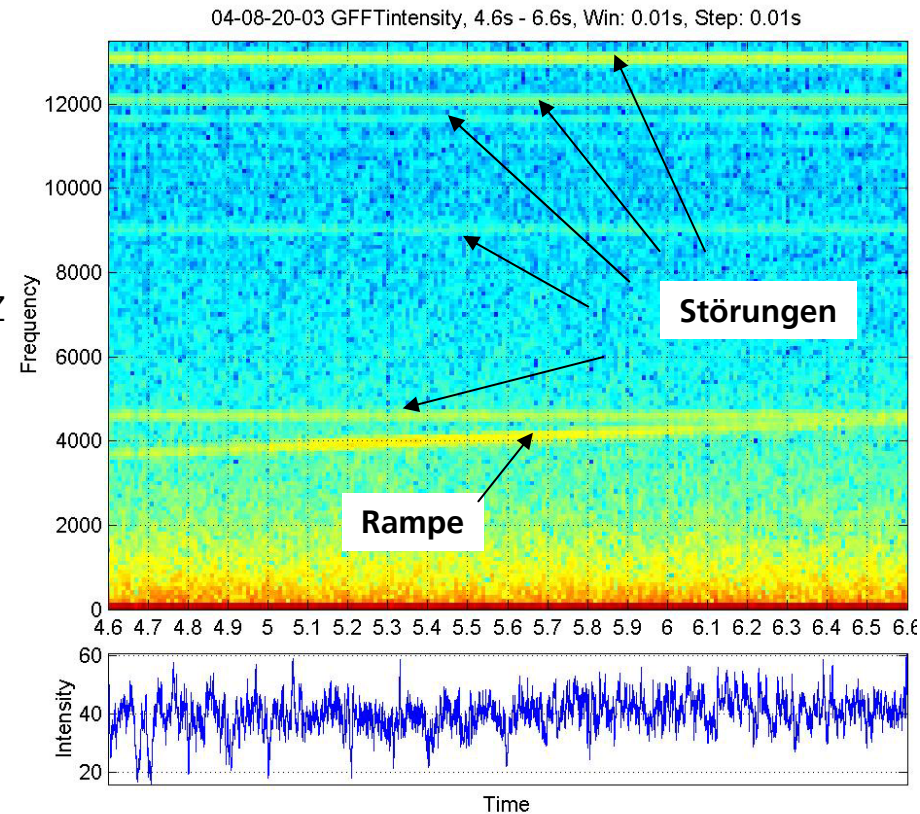
1. Gain verkleinern
2. Blende vergrößern



Störfrequenzen bei HS-OH-Videos

Überlagerung von Störfrequenz und Rampe

- ▶ auch ohne Verbrennung sichtbar
- ▶ Elektronisch bedingt (Bildverstärker)
- ▶ mit zunehmendem Gain sinkt Störfrequenz
- ▶ mit zunehmender Frame Rate steigt Störfrequenz



Zusammenfassung

Ergebnisse

- ▶ Orientierung der Moden in Kalt- und Heißversuchen nach Position der stärksten Anregung
- ▶ Rückschlüsse auf Wärmefreisetzung während Resonanz über OH-Eigenleuchten
- ▶ klare Hinweise auf Kopplung der Wärmefreisetzung mit dem Druck
 - Anregung 90° relativ zu Injektor: $\omega_{\text{Flamme}} \neq 2 \omega_{\text{Druck}}$ (keine Geschwindigkeitskopplung)
 - lokale Intensitätsschwankung bei 180° Anregung in Injektornähe am höchsten
 - Responsefaktor bei 180° Anregung am größten
- ▶ Verifikation der Ergebnisse durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit großem Fenster (gesamter Brennkammerdurchmesser)